第 42 卷 第 1 期
2025 年 2 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 42 No. 1
Feb. 2025

DOI:10. 11776/j. issn. 1000-4939. 2025. 01. 018

六边形断面超高层建筑风荷载研究

王磊[1,2],尹伊[1],陈凯[2,3],唐意[2,3],郝玮[2,3]

(1. 河南理工大学土木工程学院,454000 焦作;2. 建筑安全与环境国家重点实验室,100013 北京;
3. 国家建筑工程技术研究中心,100013 北京)

摘　要:为了研究六边形断面超高层建筑的静力和动力风荷载,开展了一系列刚性测压模型和多自由度气弹模型风洞试验,测量了刚性模型表面风压和气弹模型风致位移。对于静力风荷载,分析了体型系数和静风力系数的变化规律,建立了顺风向平均基底弯矩系数和平均阻力系数的经验公式。对于动力风荷载,分析了横风向荷载功率谱和均方根基底弯矩,建立了横风向广义风荷载功率谱和归一化均方根基底弯矩系数的经验公式。最后,基于多自由度气弹模型的风致振动试验结果,验证了经验公式的精确性。

关键词:超高层建筑;六边形断面;风荷载;风洞试验

中图分类号:TU973.2;V211.7　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-4939(2025)01-0164-10

Wind load analytical model of super high-rise building with hexagonal section

WANG Lei[1,2],YIN Yi[1],CHEN Kai[2,3],TANG Yi[2,3],HAO Wei[2,3]

(1. School of Civil Engineering,Henan Polytechnic University,454000 Jiaozuo,China;
2. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment,100013 Beijing,China;
3. National Engineering Research Center of Building Technology,100013 Beijing,China)

Abstract:To study the static wind load and dynamic wind load of super tall buildings with hexagon section,wind tunnel tests of rigid pressure model and multi-degree-freedom aeroelastic model were carried out. The wind pressure of rigid model and the wind induced response of aeroelastic model were measured. For the along-wind load,the shape coefficient and the coefficient of static wind force are studied,and their analytical models are established. For the dynamic wind load,the power spectrum and the RMS base moment coefficient of the cross-wind load are analyzed,and the analytical models of power spectrum and the RMS base moment coefficient are established. Finally,based on the wind tunnel test results of the multi-degree-freedom aeroelastic model,the accuracy of the proposed analytical models are verified.

Key words:super high-rise building; hexagon section; wind load; wind tunnel test

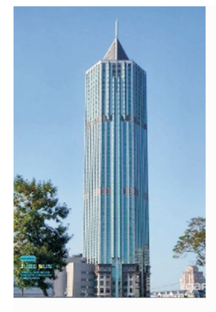
收稿日期:2022-02-24

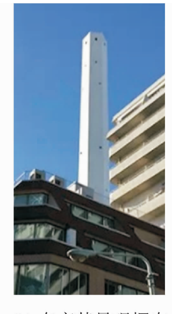
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51708186);河南省自然科学基金资助项目(No. 232300420079);建筑安全与环境国家重点实验室开放课题基金资助项目(No. BSBE2020-5)

通信作者:王磊,副教授。E-mail:tumuwanglei@163. com

引用格式:王磊,尹伊,陈凯,等. 六边形断面超高层建筑风荷载研究[J]. 应用力学学报,2025,42(1):164-173.
WANG Lei,YIN Yi,CHEN Kai,et al. Wind load analytical model of super high-rise building with hexagonal section[J]. Chinese journal of applied mechanics,2025,42(1):164-173.

近年来,超高建筑数目日益增多,建筑断面形状多种多样。作为典型断面形式之一,正六边形断面超高建筑不在少数,如天津信达广场、东京某景观建筑等(图 1)。六边形断面高柔结构在风荷载作用下可能出现大幅风致振动,风荷载的精确评估是结构设计的必要环节。


(a) 天津信达广场


(b) 东京某景观烟囱

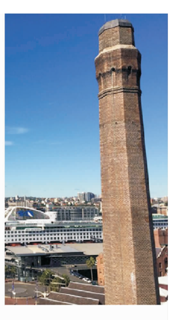

(c) 甘迪亚某烟囱

图 1　六边形断面高柔建筑

Fig. 1　High structure with hexagonal section

从超高层建筑风荷载的既有研究来看,矩形和圆形断面超高层建筑的研究成果已较为丰富,正六边形断面超高层建筑的相关研究还不够充分。STECKLEY[1]、唐意[2]、KIM 等[3]先后通过风洞试验对正六边形建筑的基底弯矩系数等参数进行了研究。TANAKA 等[4]开展了刚性模型测压试验,分析了六边形建筑的风力特性。TAMURA 等[5]对正六边形超高层建筑进行了刚性模型测压和高频测力天平试验研究。王磊等[6]对正六边形超高层建筑进行了多自由度气弹模型试验,测量了不同风向角的风致响应,指出了该类建筑最可能出现涡激共振的风向角。

从当前主流风荷载规范[7-12]来看,正六边形断面超高层建筑风荷载条文较为粗略,且不同规范之间存在一定差异。欧洲规范[7]对正六边形断面建筑风力系数的最大建议值为 1.6。美国规范[8]规定,正六边形断面超高层建筑在高宽比为 1 ~ 25 时,风力系数为 1.0 ~ 1.4。加拿大规范[9]、日本规范[10]和澳大利亚规范[11]未涉及正六边形超高层建筑的风荷载。中国规范[12]仅给出了立面迎风时正六边形超高层建筑的体型系数。事实上,既有研究表明,中国规范所规定的这一风向角并不是正六边形超高层建筑的最危险风向角[2-3,6],使得中国规范相关条文的参考性有所降低。

总结而言,既有研究和现行规范未对正六边形超高层建筑的体型系数给出合理建议,所给出的风力系数亦不够明确,尤其未建立动力风荷载的经验公式。超高层建筑的典型规则断面只有为数不多的几种多边形,对每一类断面超高建筑的风荷载进行系统研究都是有必要的。鉴于此,本研究按照成熟的传统做法,通过刚性测压模型和多自由度气弹模型风洞试验,对正六边形超高层建筑的静力和动力风荷载展开研究,以期为实际工程中可能出现的六边形超高建筑的风荷载取值提供依据。

1　风洞试验简介

1.1　刚性测压模型试验

针对六边形断面超高层建筑,进行了 3 种高宽比($\lambda = 10, 8, 6$)的刚性模型测压试验,几何缩尺比为 1∶600,模型高度分别为 1、0.8、0.6 m,分别代表 600、480、360 m 高的实际超高层建筑。各模型自上而下等间距布置了 5 层测压点,每层测压点数为 36 个,各层测点布置情况见图 2,部分风洞试验照片见图 3。

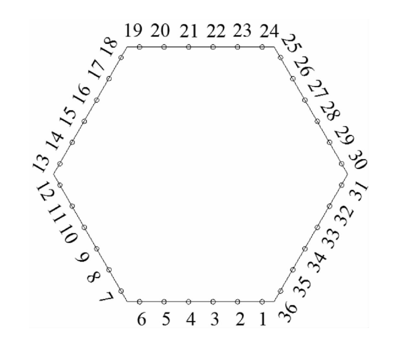


图 2　测压点图

Fig. 2　Pressure points



图 3　部分风洞试验照片($\lambda = 10$)

Fig. 3　Wind tunnel test photo($\lambda = 10$)

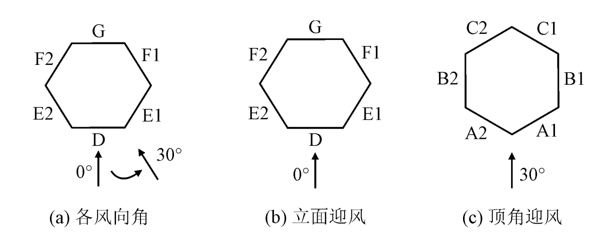


图4 风向角示意图

Fig. 4 Definition of wind direction

考虑六边形的对称性,试验风向角为0°~30°,间隔5°,各风向角及两种典型风向角的定义见图4。试验流场为均匀平滑流、B类粗糙度流场和D类粗糙度流场,各试验工况见表1。

表1 刚性测压模型风洞试验工况

Tab. 1 Wind tunnel test conditions of rigid pressure models

高宽比 λ	风场	风向角 θ/(°)
6	均匀流/B/D	0~30
8	均匀流/B/D	0~30
10	均匀流/B/D	0~30

1.2 多自由度气弹模型试验

多自由度气弹模型骨架由铝合金6061板材加工连接而成。如图5所示,首先制作6块六边形刚性板,在各刚性板中间预留一个六边形孔洞。然后用铝柱穿过孔洞,将刚性板等间距地串联并固定,即制成模型骨架。模型外衣由有机玻璃制成,每段外衣都固定在对应的刚性板上,各段外衣间距为2 mm左右。模型制作完毕后,对模型进行敲击自由振动试验。通过激光位移计来测量模型顶部横风向风致位移响应,通过加速度传感器来测量模型不同高度的横风向风致加速度响应。结合谱分析和随机减量方法,可以得到模型的动力特性参数。通过在刚性板上粘贴配重块来调节模型质量,通过在刚性板之间设置轻质泡沫条来改变模型阻尼比。具体调试和测量方法可参见相关文献[6,13-14],此处不再赘述。

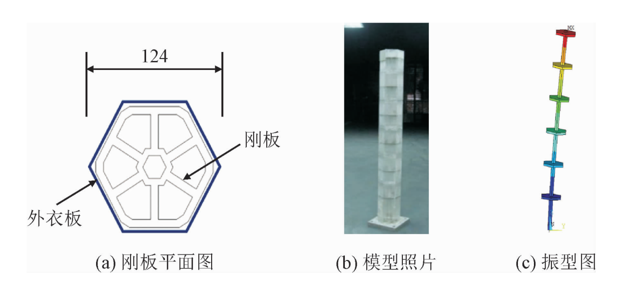


Fig. 5 多自由度气弹模型设计

Fig. 5 Design of aeroelastic MDOF model

按照上述方法制成的模型骨架,其刚度和质量自上而下均匀分布。根据上述制作调试方法,本研究共进行了3种结构动力参数的气弹模型实验。本研究各工况的动力参数见表2,表2中的频率为各工况模型的一阶平动频率。

表2 气弹模型风洞试验工况

Tab. 2 Wind tunnel test conditions of aero-model

工况	高度/m	频率/Hz	质量/kg	阻尼比/%	*Sc*
1	1.0	9.00	2.45	1.11	4.35
2	1.0	7.75	3.05	1.55	7.57
3	1.0	8.31	2.69	1.91	8.22

表2中,当量质量 M 和 Sc 数的计算公式如下。

$$M = \frac{\int_0^H m(z)\varphi^2(z)\,\mathrm{d}z}{\int_0^H \varphi^2(z)\,\mathrm{d}z} \tag{1}$$

$$Sc = \frac{2M\zeta_s}{\rho_a S} \tag{2}$$

式中:$m(z)$为单位高度的质量;$\varphi(z)$为平动振型;H为模型高度;ζ_s、ρ_a分别为结构阻尼比和空气密度。

在调查大量实际超高层建筑动力特性的基础上,确定本气弹模型各参数的缩尺比见表3。其中,气弹模型的几何缩尺比为1∶600,表示气弹模型对应了实际600 m的超高层建筑;频率缩尺比为80∶1,表示本气弹模型对应实际建筑物的一阶频率为0.097~0.113 Hz。

表3 气弹模型缩尺比

Tab. 3 Scale ratios of aero-model

长度 l_m/l_p	频率 n_m/n_p	速度 V_m/V_p	密度 m_m/m_p
1/600	80/1	1/7.5	1/1

注:表中下标m和p分别表示模型和实际。

1.3 试验风场

试验在武汉大学WD-1风洞试验室中进行,该风洞断面尺寸为3.2 m×2.1 m,各模型阻塞比都在2%以内。B类和D类粗糙度试验流场的湍流度和平均风速剖面模拟结果见图6,其中B类和D类粗糙度流场在风洞中的梯度风高度分别为58.3 cm和91.7 cm。

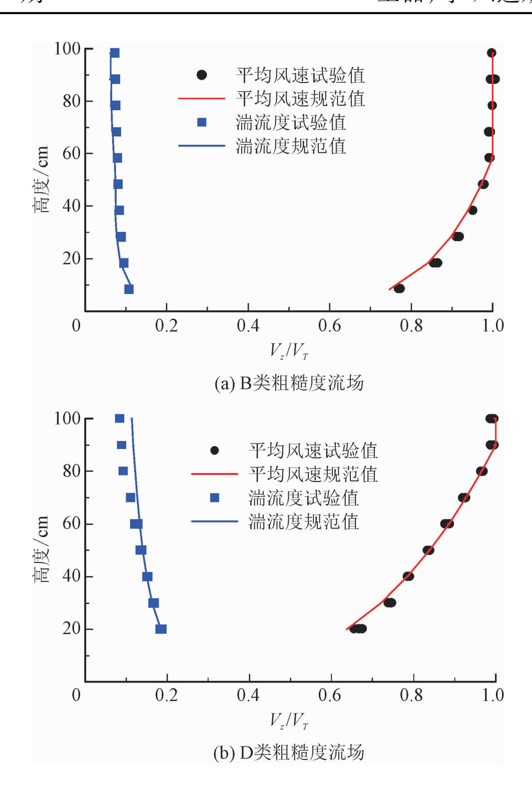


图 6　试验流场风剖面

Fig. 6　Wind profile in wind tunnel

2　风力系数计算方法说明

根据各测点风压时程可算得平均风压系数为

$$\mu_{sj}=\frac{w_j}{\rho V_j^2/2} \tag{3}$$

式中：w_j 为测点 j 高度处的平均风压；V_j 为测点 j 高度处的平均风速。

体型系数由各测点平均风压系数加权得到，即

$$\mu_s=\sum_j\frac{\mu_{sj}A_j}{A} \tag{4}$$

平均阻力系数 C_D、平均升力系数 C_L 和平均扭矩系数 C_M 的计算公式为

$$C_D=\frac{F_D(z)}{0.5\rho V_z^2A(z)} \tag{5}$$

$$C_L=\frac{F_L(z)}{0.5\rho V_z^2A(z)} \tag{6}$$

$$C_M=\frac{F_M}{0.5\rho V_z^2A(z)B} \tag{7}$$

式中：F_D 和 F_L 分别为顺风向和横风向平均风力；F_M 为平均扭矩；$A(z)$ 是 z 高度处的迎风面积；V_z 为 z 高度处平均风速；B 为迎风面宽度。

归一化基底弯矩系数 C_{M_D}、C_{M_L} 的计算式为

$$C_{M_D}=\frac{M_D}{0.5\rho V_H^2BH^2} \tag{8}$$

$$C_{M_L}=\frac{M_L}{0.5\rho V_H^2BH^2} \tag{9}$$

式中：M_D、M_L 为顺风向和横风向的平均基底弯矩；V_H 为模型顶部平均风速。

式(3)~式(9)为静风力系数的计算方法，动态风力系数计算方法与此类似，将式(3)~式(9)分子换成相应的脉动风力即可，不再重复介绍。

3　静力风荷载分析

3.1　风向角对体型系数的影响

以高宽比为 6 的模型在 B 类粗糙度流场的情况为例，图 7 给出了模型各立面的体型系数。从图 7 可以看出，在风向角从立面迎风转至顶角迎风的过程中，D 面体型系数绝对值单调减小，E1、F2、G 和 F1 面的体型系数绝对值单调增大。E2 面的体型系数绝对值先增大后减小，绝对值在 15°时达到最大(0.9)。整体来看，除 E2 面外，各立面体型系数最大值均出现在立面迎风或顶角迎风这 2 种风向角下。

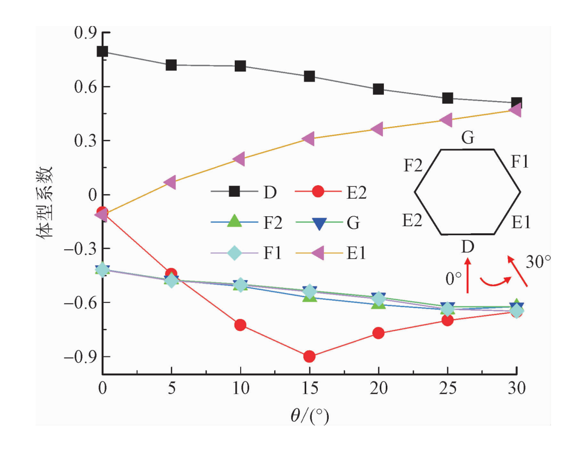


图 7　0°~30°风向角下各立面体型系数

Fig. 7　Shape coefficients of each facade (0°~30°)

3.2　流场类型对体型系数的影响

图 8 给出了不同流场中各立面的体型系数。从图 8 可以看出，不同流场中各立面的体型系数差别很小，这与业界的常规认知是一致的。

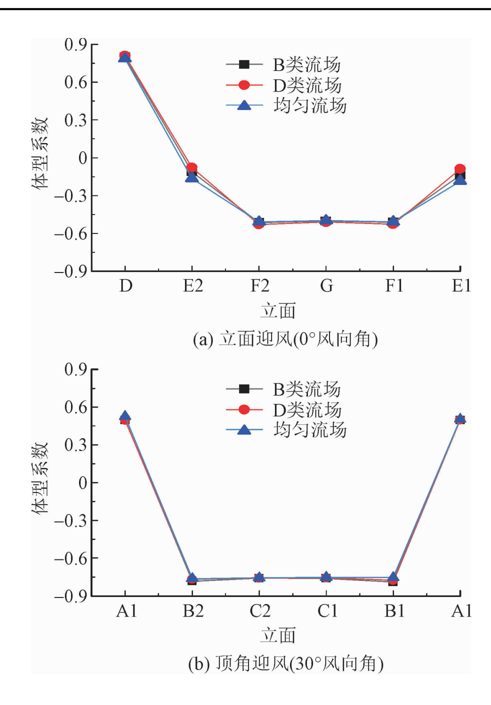


图 8　不同粗糙度流场中的体型系数($\lambda=6$)

Fig. 8　Shape coefficients varying with field roughness ($\lambda=6$)

3.3　体型系数随高宽比的变化

图 9 是不同高宽比模型在 B 类流场中的各立面体型系数。从图 9 可以看出,在 2 种典型风向角下,体型系数随高宽比增大有所减小。

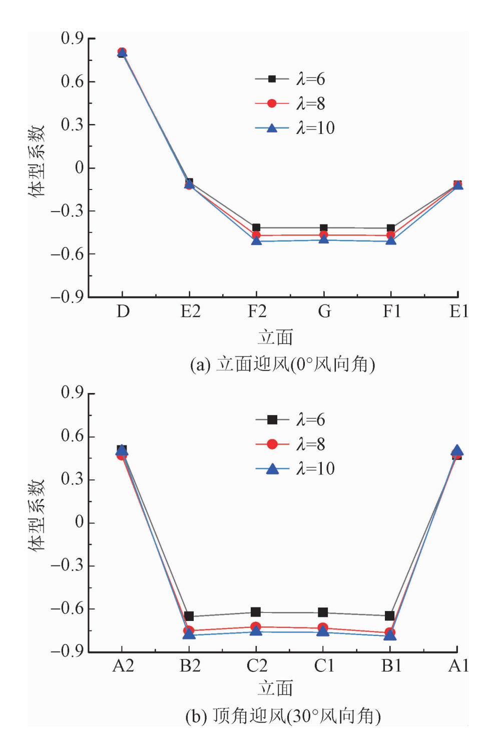


图 9　不同高宽比的体型系数

Fig. 9　Shape coefficients varying with aspect ratio

3.4　试验体型系数与规范值对比

图 10 为风洞试验体型系数与中国规范的对比情况。从图 10 来看,立面迎风时(0°风向角),两斜迎风面 E1、E2 体型系数为 -0.10 ~ -0.13,绝对值略大于规范值;其他立面体型系数与规范值基本一致。仅就 0°风向角而言,中国规范值是安全而合理的。但是,中国规范没有考虑其他可能更为危险的风向角,这是中国规范有待完善的一个方面。

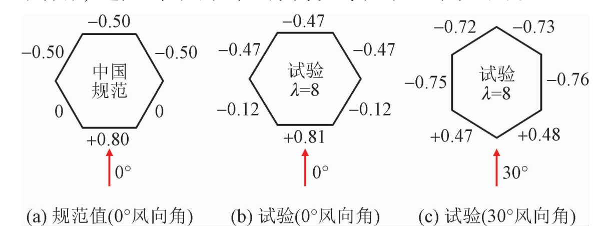


图 10　中国规范与试验体型系数对比

Fig. 10　Shape coefficients of Chinese code and test results

3.5　静力风荷载的拟合公式

图 11 给出不同风向角的平均三分力系数和归一化平均风力。

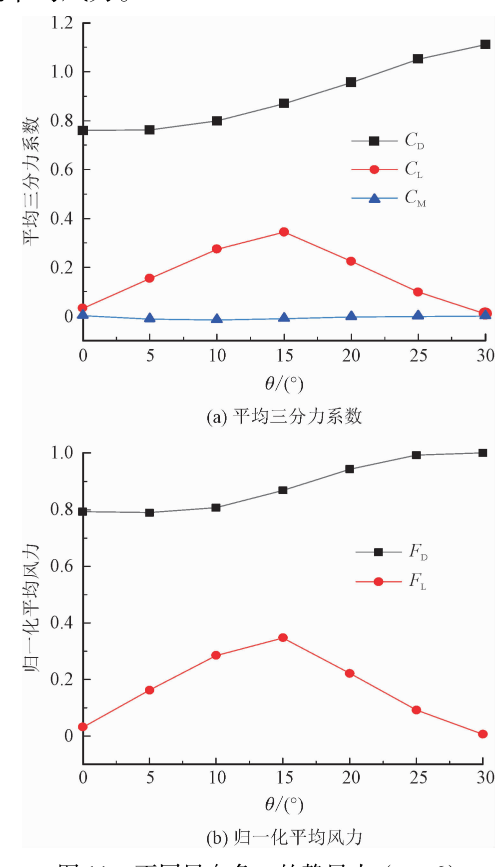


图 11　不同风向角 θ 的静风力 ($\lambda=6$)

Fig. 11　Static wind load of different θ($\lambda=6$)

其中,归一化平均风力是将不同风向角的平均

风力系数乘以相应的受风面积,并令最大平均风力为 1.0 得到。从图 11 中可以看出,模型从立面迎风至顶角迎风的过程中,阻力系数和平均阻力单调增大,升力系数和平均升力先增大后减小,并在 15°风向角时达到最大值。整体看来,顺风向静风力显著大于横风向和扭转向。各风向角扭矩系数 C_M 最大值为 0.016,远小于方形断面的扭矩系数 0.07[3],这是因为六边形断面相对更接近于圆形,使得其扭转静力风荷载相对很小。根据上述结果,由于横风向和扭转向的静力风荷载相对较小,对于静力风荷载,下文仅研究顺风向的静风力系数。

图 12 为不同高宽比模型 C_D 随风向角的变化情况。由图 12 可知:立面迎风时(0°风向角),3 种高宽比模型的 C_D 分别为 0.77、0.81、0.85,略小于规范值 0.9,顶角迎风时(30°风向角),3 种高宽比模型的 C_D 在 1.1 ~ 1.3 之间,大于中国规范结果,最大阻力系数比中国规范大 40%,如果将不同风向角的受风面积考虑在内,阻力最大值比中国规范大 20%,这一差异是值得注意的。

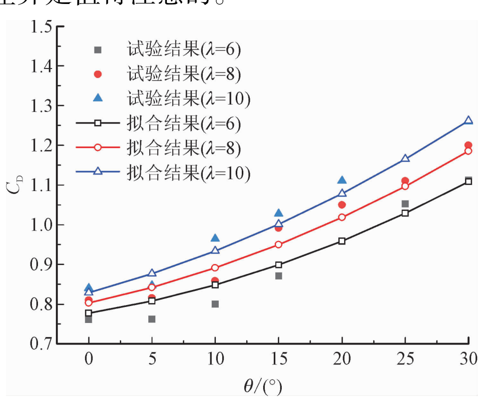


图 12　不同风向角的 C_D

Fig. 12　C_D of different wind direction

根据图 12 的结果,建立平均阻力系数经验计算式如下。

$$C_D = 0.000\,195\theta^2 + 0.000\,85\lambda\theta + 0.012\,9\lambda + 0.7 \tag{10}$$

式中:λ 为高宽比;θ 为风向角。从图 12 的拟合效果来看,经验计算式(10)具有较高的精度。

图 13 给出了顺风向 C_{M_D} 平均基底弯矩系数随风向角的变化情况。整体而言,C_{M_D} 随风向角的变化规律与图 11 的风力系数是一致的。根据上述结果,建立顺风向平均基底弯矩系数经验计算式如下。

$$C_{M_D} = 0.000\,07\theta^2 + 0.000\,21\lambda\theta + 0.018\lambda + 0.27 \tag{11}$$

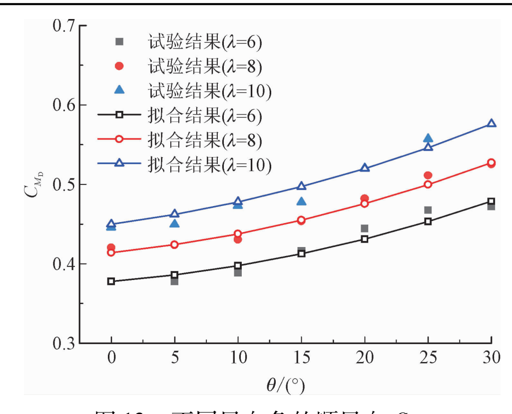


图 13　不同风向角的顺风向 C_{M_D}

Fig. 13　C_{M_D} of different wind direction

4　动力风荷载分析

超高层建筑的顺风向动力风荷载通常可以根据准定常假定来获得,而横风向动力风荷载则要根据试验数据来确定,故而,本节主要研究横风向动力风荷载。

4.1　风向角的影响

以高宽比为 6 的模型在 B 类粗糙度流场的情况为例,图 14 给出了正六边形断面建筑的无量纲横风向荷载功率谱随风向角的变化。图中 $S(n)$ 为模型的横风向荷载功率谱,σ 为均方根基底弯矩,n 为频率。

从图 14 的结果来看,模型从立面迎风转动至顶角迎风的过程中,荷载功率谱的谱峰值和谱峰对应的卓越频率略有增大。荷载功率谱的频带宽度在 30°时达到最小,这是因为,顶角迎风时来流在建筑两侧更易形成规律的漩涡脱落,使得该风向角的荷载功率谱呈典型窄带尖峰状。

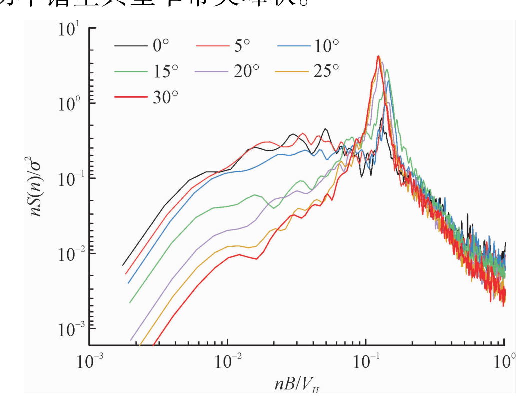


图 14　横风向荷载功率谱随风向角的变化

Fig. 14　PSD of crosswind load varying with wind direction

以高宽比为 6 的模型在 B 类粗糙度流场的情况

为例,图 15 给出了正六边形断面建筑的归一化横风向均方根基底弯矩系数随风向角的变化。从图 15 的结果来看,归一化横风向均方根基底弯矩系数 C_{M_σ} 在 0°风向角时最小,随风向角的增大大致呈增加趋势,在 20°风向角时达到最大值,此后基本保持稳定。

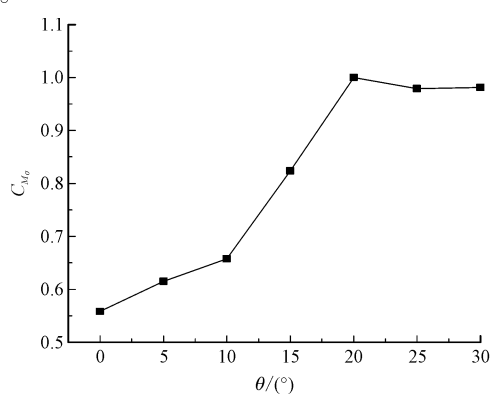


图 15 C_{M_σ} 均方根随风向角的变化

Fig. 15 C_{M_σ} varying with wind direction

综合以上结果,顶角迎风时的顺风向和横风向风荷载相对较大,并且,作为左右对称的典型风向角,顶角迎风时的横风向涡脱力相对规则,易引起显著的横风向振动。故而,对于横风向动力风荷载功率谱,下文仅讨论 30°风向角的情况。

4.2 流场粗糙度的影响

以高宽比为 10 的模型为例,图 16 给出了顶角迎风时不同粗糙度流场的横风向荷载功率谱。由图 16 可知,随着流场粗糙度的增大,六边形建筑的横风向功率谱的峰值变小、频带宽度变大。这是由于紊流减弱了漩涡脱落的规则性,造成卓越频率处的能量变小。同时,紊流对低频段能量影响较大,造成低频段能量随粗糙度的增加而增大。

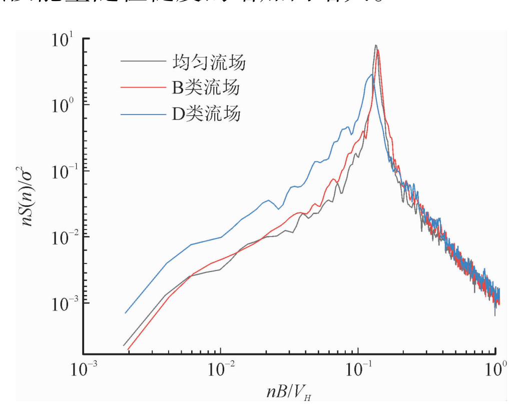


图 16 横风向荷载功率谱随流场粗糙度的变化

Fig. 16 PSD of crosswind load varying with field roughness

4.3 高宽比的影响

图 17 为 B 类流场中不同高宽比模型的横风向荷载功率谱。由图 17 可知:不同高宽比模型的荷载功率谱形状差异不大,均为窄带尖峰状;随高宽比增大,荷载功率谱带宽变窄,谱峰值处能量略有增加,谱峰值对应的卓越频率也相应增大。

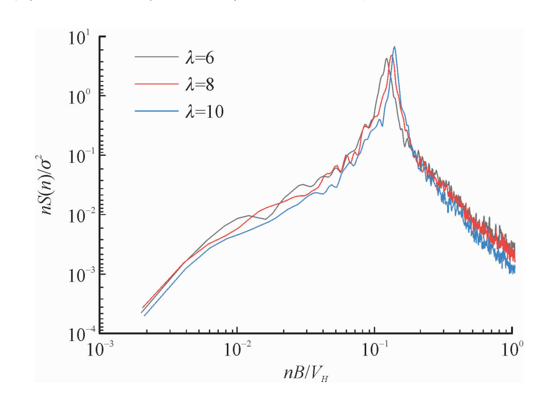


图 17 横风向荷载功率谱随高宽比 λ 的变化

Fig. 17 PSD of crosswind load varying with λ

4.4 动力风荷载经验公式

参考《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[12]中矩形断面超高层建筑的横风向荷载功率谱经验公式的形式,根据本研究试验数据,建立六边形断面横风向荷载功率谱经验计算式如下。

$$S_{F_L} = \frac{S_P \beta_k (n/n_{st})^\gamma}{[1-(n/n_{st})^2]^2 + \beta_k (n/n_{st})^2} \tag{12}$$

$$n_{st} = -0.000\,625\lambda^2 + 0.014\,2\lambda - 0.007\alpha + 0.745 \tag{13}$$

$$S_P = (0.121\alpha^{-0.42} - 0.001\,18e^{\alpha})(0.058\,2e^{0.636\lambda} + 16.005) + 2.75 \tag{14}$$

$$\gamma = 0.017\,5\lambda^2 - 0.33\lambda - 0.068\,5\alpha + 3.087 \tag{15}$$

$$\beta_k = -0.001\lambda^2 + 0.005\,8\lambda + 0.031\alpha + 0.001 \tag{16}$$

式中:S_{F_L} 为归一化的横风向广义风荷载功率谱;λ 为高宽比;α 为地面粗糙类别,B 类和 D 类流场分别按 2、4 取值;n_{st}、S_P、γ、β_k 分别为横风向风力荷载谱的谱峰频率系数、谱峰系数、偏态系数、带宽系数。

图 18 给出了横风向动力风荷载经验公式的部分拟合结果。从拟合效果来看,经验公式与试验数据吻合较好。

(a) B类流场(λ=6)　　(b) B类流场(λ=8)

(c) B类流场(λ=10)　　(d) D类流场(λ=10)

图 18　横风向广义风荷载功率谱拟合结果

Fig. 18　Fitting results of generalized crosswind load spectrum

对于横风向动力风荷载,上述归一化广义荷载功率谱表征了荷载能量在不同频段的相对大小,而荷载能量的绝对大小则要通过均方根基底弯矩来体现。图 19 给出了 30°风向角下不同高宽比的归一化均方根基底弯矩系数。综合本研究试验结果以及既有文献[2,5]对于特定高宽比模型的试验结果,建立横风向归一化均方根基底弯矩系数的经验公式如下。

$$C_{M_\sigma} = -0.0035\lambda + 0.1162 \qquad (17)$$

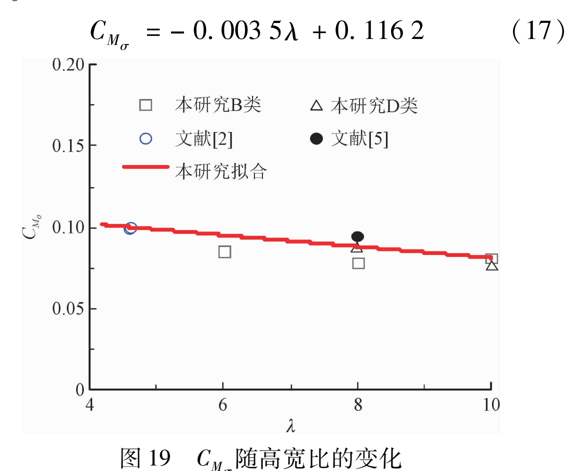


图 19　C_{M_σ}随高宽比的变化

Fig. 19　C_{M_σ} varying with λ

风力系数随高宽比变化原因是由于三维绕流的存在,不同高度风力系数分布呈顶部和底部小、中部大的特征。按照这一分布规律,模型高宽比越大,中部风力的权重越大,从而造成整体风力系数(比如阻力系数和基底弯矩系数)随高宽比的增大而增大。美国规范[8]将风力系数视为高宽比的函数也正是基于这一考虑。

5　动力风荷载经验公式的检验

为验证所建立的动力风荷载经验公式的精度,进行了多自由度(multi degree of freedom,MDOF)气弹模型试验。

5.1　多自由度气弹模型风致响应

图 20 为模型顶部横风向位移均方根 σ_y 随折算风速的变化情况,图中位移结果是按缩尺比 1∶600 换算后的实际位移。当顶角迎风时,六边形柱体的斯特劳哈尔数约为 0.13,相应的理论共振临界折算风速约为 8。从图 20 可以看出,各工况横风向均方根位移响应在临界风速 8 附近显著增大,出现了显著的涡激振动现象。显然,该风向角的大幅涡振现

象由图 14 所示的荷载功率谱特性所致。

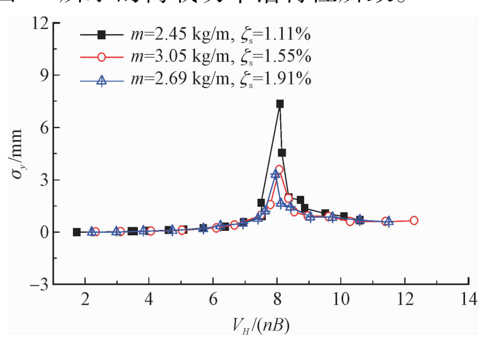


图 20 顶角迎风时的横风向位移均方根 σ_y

Fig. 20 σ_y with wind attacking one corner

图 21 为顶角迎风时的气动阻尼比随折算风速的变化曲线。图 21 的规律与典型方截面气动阻尼比研究结果是一致的。在低折算风速时横风气动阻尼在零附近，在共振风速之前达到最大值，在共振风速段出现最小值，之后又逐渐回升。显然，图 21 的横风向气动阻尼比这一变化规律与图 20 的横风向响应水平是相互影响的。

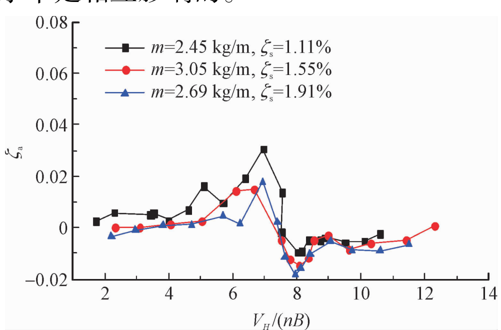


图 21 顶角迎风时的横风向气动阻尼比 ζ_a

Fig. 21 ζ_a with wind attacking one corner

5.2 经验公式结果与 MDOF 试验结果对比

为了验证本研究所建立的横风向风荷载经验公式的精度，将经验公式与随机振动理论结合来计算结构的风致位移响应，继而与多自由度气弹模型试验结果进行对比。由于基阶振型分量在总响应中占主导地位，本研究仅计算基阶模态的横风向响应。计算思路简述如下。

首先，根据式(12)～式(16)计算横风向荷载功率谱，根据式(17)计算横风向均方根基底弯矩系数；然后结合表2、表3 中的参数，换算得到实际建筑的横风向荷载功率谱 $S(n)$；最后通过式(18)～式(19)计算得到建筑物顶部横风向位移响应均方根。

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{(2\pi n_1)^4 (M^*)^2} \int_0^\infty S(n) \; |H(n)|^2 \mathrm{d}n \tag{18}$$

式中：M^* 为广义质量；$|H(n)|$ 为频响函数，考虑图 21 中气动阻尼比的贡献，其表达式为

$$|H(n)| = \sqrt{\frac{1}{[1-(n/n_1)^2]^2 + 4(\zeta_s+\zeta_a)^2 (n/n_1)^2}} \tag{19}$$

图 22 给出了按“经验公式 + 随机振动理论”计算的均方根位移和 MDOF 模型位移的对比情况。

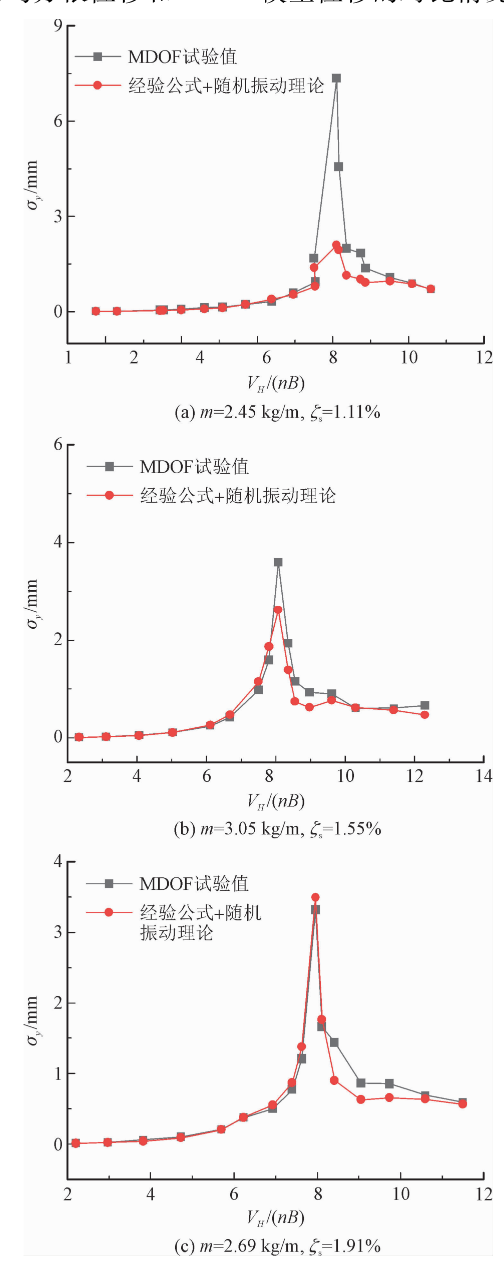


图 22 经验公式位移与 MDOF 位移对比

Fig. 22 Displacement of analytical model and MDOF

从图 22 可以看出，当折算风速小于 7.5 或大于 10 时，结构顶部位移计算值与试验值吻合良好，相对差值在 5% 以内。在折算风速为 7.5～10 范围内，计算值与试验值差别较大，这种差别对轻质小阻尼

工况更为显著(图 22a),而质量-阻尼较大时,这种差别则相对较小(图 22b、图 22c)。

需要说明的是,折算风速 7.5 ~ 10 范围内的计算值与试验值差别较大是一种必然结果。这是因为,共振风速段内的风致振动伴随有强流固耦合效应,且质量-阻尼越小,风致振动水平越显著,流固耦合效应就越强。对于共振风速附近这一特定状态下的风致振动,风振机理相对复杂,其风振结果的精确计算是业界暂未完全解决的一个课题。

上述结果表明,本研究所建立的动力风荷载经验公式的精度较高,可以为共振风速段之外的风致响应计算提供精确依据。对于共振风速段内,当结构的质量-阻尼较大时,本研究的动力风荷载经验公式的计算结果也具有一定参考性。

6 结 论

本研究在刚性测压模型和多自由度气弹性模型风洞试验基础上,研究了正六边形建筑的静力和动力风荷载,提出了风荷载的经验公式,并验证了经验公式的精确性。主要结论如下。

1)在正六边形断面模型风向角从立面迎风转至顶角迎风的过程中,顺风向静力风荷载单调增大,横风向静力风荷载先增大后减小,并在 15°风向角达到最大。整体而言,顺风向静力风荷载显著大于横风向和扭转向静力风荷载。

2)六边形断面顶角迎风时,最大阻力系数比中国规范建议值大 40%,最大阻力比规范建议值大 20%,因而,应以顶角迎风的情况作为控制风向角。

3)横风向荷载谱峰值随湍流度增大而减小,随高宽比的增大而增大,均方根基底弯矩系数随高宽比的增大略有减小。顶角迎风时荷载功率谱曲线表现为典型的窄带尖峰状,且横风向动态响应和气动阻尼比十分显著。

4)对于高宽比为 6 ~ 10 的正六边形断面超高建筑,本研究所给出的体型系数、顺风向静风力系数、横风向动风力系数和横风向荷载功率谱的经验公式可以为抗风初步设计提供指导,并为建筑结构荷载规范的完善提供参考。

参考文献:

[1] STECKLEY A. Motion-induced wind forces on chimneys and tall buildings[D]. London: Western University, 1989.

[2] 唐意. 高层建筑弯扭耦合风致振动及静力等效风荷载研究[D]. 上海:同济大学,2006.

[3] KIM Y C, BANDI E K, YOSHIDA A, et al. Response characteristics of super-tall buildings-effects of number of sides and helical angle[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2015, 145:252-262.

[4] TANAKA H, TAMURA Y, OHTAKE K, et al. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2012, 107:179-191.

[5] TAMURA Y, XU X D, TANAKA H, et al. Aerodynamic and pedestrian-level wind characteristics of super-tall buildings with various configurations[J]. Procedia engineering, 2017, 199:28-37.

[6] 王磊,张渊召,张振华,等. 正六边形超高层建筑横风向气弹效应研究[J]. 土木工程学报,2018,51(11):113-119.
WANG Lei, ZHANG Yuanzhao, ZHANG Zhenhua, et al. Crosswind aeroelastic effects of super high-rise building with hexagonal section[J]. China civil engineering journal, 2018, 51(11):113-119(in Chinese).

[7] European Commission. Eurocode 1: actions on structures- part 1-4: general actions-wind actions: EN 1991-1-4:2005[S]. Brussels: European Commission, 2005.

[8] ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE/SEI 7-10[S]. Reston, VA, USA: ASCE, 2010.

[9] Canadian Standards Association Group. Antennas, towers, and antenna-supporting structures: CSA-S37-1994[S]. Rexdale: CSA, 1995.

[10] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on building[S]. Tokyo: AIJ, 2004.

[11] Australian/New Zealand Standard. Structural design actions. Part 2: wind actions: AS/NZS 1170.2:2011[S]. Wellington: Australian/New Zealand Standard, 2011.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[13] WANG L, FAN X Y, LIANG S G, et al. Improved expression for across-wind aerodynamic damping ratios of super high-rise buildings[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 176:263-272.

[14] WANG L, LIANG S G, HUANG G Q, et al. Investigation on the unstability of vortex induced resonance of high-rise buildings[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 175:17-31.

(编辑 李坤璐)